

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号  
特開2000-180143  
(P2000-180143A)

(43)公開日 平成12年6月30日(2000.6.30)

(51)Int.Cl.<sup>7</sup>

G 0 1 B 15/02

識別記号

F I

G 0 1 B 15/02

テーマコード(参考)

B 2 F 0 6 7

審査請求 有 請求項の数8 OL (全11頁)

(21)出願番号 特願平10-351928

(22)出願日 平成10年12月10日(1998.12.10)

(71)出願人 000004237

日本電気株式会社

東京都港区芝五丁目7番1号

(72)発明者 山田 恵三

東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内

(74)代理人 100108578

弁理士 高橋 昭男 (外3名)

Fターム(参考) 2F067 AA27 BB17 CC17 DD10 HH06

JJ05 KK00 KK04 LL02 QQ03

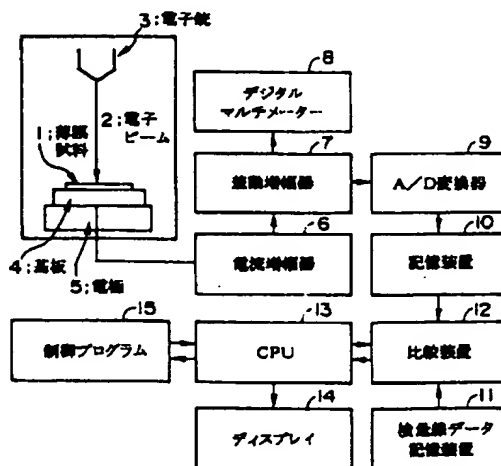
RR12 RR24 RR29

(54)【発明の名称】 膜厚測定装置および膜厚測定方法

(57)【要約】

【課題】 薄膜の膜厚、特に極薄薄膜の膜厚を正確に測定でき、また、アスペクトレシオの大きなコンタクトホール内部にある薄膜の膜厚も測定でき、複数の膜からなる多層膜の最表面の膜厚も測定できる膜厚測定装置および膜厚測定方法を提供する。

【解決手段】 基板上の薄膜に電子ビームを照射する電子ビーム照射手段と、前記薄膜を貫通して前記基板に到達した貫通電流を捕集するための前記基板4に接触して配置された電極と、該電極を介して前記貫通電流を検出する電流検出手段と、前記薄膜と同一材料の標準試料についての貫通電流と膜厚との相関データから前記電流検出手段によって検出された前記貫通電流を前記薄膜の膜厚に換算する膜厚換算手段とを備えたことを特徴とする。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 基板上の薄膜に電子ビームを照射する電子ビーム照射手段と、前記薄膜を貫通して前記基板に到達した貫通電流を捕集するための前記基板に接触して配置された電極と、

該電極を介して前記貫通電流を検出する電流検出手段と、

前記薄膜と同一材料の標準試料についての貫通電流と膜厚との相関データから前記電流検出手段によって検出された前記貫通電流を前記薄膜の膜厚に換算する膜厚換算手段とを備えたことを特徴とする膜厚測定装置。

【請求項2】 請求項1に記載の膜厚測定装置において、

前記電流検出手段が、前記貫通電流を増幅する電流増幅器を備えたことを特徴とする膜厚測定装置。

【請求項3】 請求項1または請求項2に記載の膜厚測定装置において、

前記電流検出手段が、前記貫通電流以外の漏れ電流によるオフセット電圧を取り除くための差動増幅器を備えたことを特徴とする膜厚測定装置。

【請求項4】 請求項1から請求項3に記載の膜厚測定装置において、

前記薄膜上で前記電子ビームを走査するための電子ビーム走査手段と、

前記薄膜上で電子ビームの走査位置と該走査位置での貫通電流を記憶する位置電流記憶手段とを備えたことを特徴とする膜厚測定装置。

【請求項5】 請求項1から請求項4に記載の膜厚測定装置において、

前記電子ビーム照射手段によって電子ビームを照射された薄膜から放出される二次電子を検出する二次電子検出手段を備えたことを特徴とする膜厚測定装置。

【請求項6】 基板上の薄膜に電子ビームを照射し、前記薄膜を貫通して基板に達する電子を貫通電流として捕集し、該貫通電流を、前記薄膜と同一材料の標準試料についての貫通電流と膜厚との相関データから前記薄膜の膜厚に換算することを特徴とする膜厚測定方法。

【請求項7】 基板に形成された薄膜上で電子ビームを走査し、該電子ビームの複数の走査位置における前記薄膜を貫通して基板に達した貫通電流をそれぞれ検出し、それぞれの貫通電流を前記薄膜と同一材料の標準試料についての貫通電流と膜厚との相関データから膜厚に換算して、前記薄膜の膜厚分布を求めることを特徴とする膜厚測定方法。

【請求項8】 請求項5または請求項6に記載の膜厚測定方法において、

前記電子ビームを前記薄膜面に対して垂直に入射させることを特徴とする膜厚測定方法。

## 【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、電子ビームを用いた薄膜の膜厚測定装置および膜厚測定方法に関するものである。

【0002】

【従来の技術】薄膜の膜厚を知る方法として、多重反射干渉法や偏光分光法が一般的に利用されている。多重反射干渉法は、単色光を薄膜にあて単色光の繰り返し反射干渉を利用して干渉縞を作り干渉縞のずれから厚さを決定する方法である。また、偏光分光法は、偏光を薄膜に当てて、反射光の偏光の状態を観察する事により厚さを決定する方法である。

【0003】しかしながら、薄膜の光学的性質を利用する方法では薄膜に入射する光線の径が数十ミクロンから数百ミクロンと大きい場合、被測定薄膜の領域が小さい場合には測定が出来なかった。それを克服する手法として、特開昭63-9807号に開示されているように、薄膜に電子ビームを照射して薄膜内から放出される二次電子を捕集し、捕集された二次電子量と薄膜の厚さとの相関関係から基板上の薄膜の厚みを測定する手法が知られている。

【0004】第19図に従来例の膜厚測定装置を示した。この膜厚測定装置では、薄膜試料194に電子ビーム192を照射する電子銃191と、基板193および薄膜試料194から放出される二次電子195を捕集する二次電子検出器（二次電子検出手段）196とその信号を増幅する増幅回路197、電子ビームを走査するための偏向電極198および走査信号を発生する走査回路199、前記増幅器からの信号をデジタル信号に変換するA/D変換器200、そのデータを記憶する記憶装置201、および一連の処理を自動的に行うための制御を行うCPU202から成っている。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】近年、半導体の微細加工技術の進歩により極薄膜が形成される場所は必ずしも基板の平坦な面では無くなってきている。つまり、非常にアスペクトレシオの大きなコンタクトホール内部にあるシリコン酸化膜とか金属膜あるいは有機膜などの膜厚を測定する必要性が高まってきている。しかし、従来技術では基板表面から発生する二次電子を全て捕集する必要があるため、アスペクトレシオが大きな構造体の底で発生した二次電子を正確に捕集することは困難であり、測定することが不可能であるといった課題があった。

【0006】本発明は、上述した事情に鑑みてなされたもので、薄膜の膜厚、特に極薄膜の膜厚を正確に測定でき、また、アスペクトレシオの大きなコンタクトホール内部にある薄膜の膜厚も測定でき、複数の膜からなる多層膜の最表面の膜厚も測定できる膜厚測定装置および膜厚測定方法をを提供する事を目的とする。

【0007】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成するため

の本発明は、以下の構成を採用した。請求項1に記載の膜厚測定装置は、基板上の薄膜に電子ビームを照射する電子ビーム照射手段と、前記薄膜を貫通して前記基板に到達した貫通電流を捕集するための前記基板に接触して配置された電極と、該電極を介して前記貫通電流を検出する電流検出手段と、前記薄膜と同一材料の標準試料についての貫通電流と膜厚との相関データから前記電流検出手段によって検出された前記貫通電流を前記薄膜の膜厚に換算する膜厚換算手段とを備えたことを特徴とする。

【0008】請求項2に記載の膜厚測定装置は、請求項1に記載の膜厚測定装置において、前記電流検出手段が、前記貫通電流を増幅する電流増幅器を備えたことを特徴とする。

【0009】請求項3に記載の膜厚測定装置は、請求項1または請求項2に記載の膜厚測定装置において、前記電流検出手段が、前記貫通電流以外の漏れ電流によるオフセット電圧を取り除くための差動増幅器を備えたことを特徴とする。

【0010】請求項4に記載の膜厚測定装置は、請求項1から請求項3に記載の膜厚測定装置において、前記薄膜上で前記電子ビームを走査するための電子ビーム走査手段と、前記薄膜上での電子ビームの走査位置と該走査位置での貫通電流を記憶する位置電流記憶手段とを備えたことを特徴とする。

【0011】請求項5に記載の膜厚測定装置は、請求項1から請求項4に記載の膜厚測定装置において、前記電子ビーム照射手段によって電子ビームを照射された薄膜から放出される二次電子を検出する二次電子検出装置を備えたことを特徴とする。

【0012】請求項6に記載の膜厚測定方法は、基板上の薄膜に電子ビームを照射し、前記薄膜を貫通して基板に達する電子を貫通電流として捕集し、該貫通電流を、前記薄膜と同一材料の標準試料についての貫通電流と膜厚との相関データから前記薄膜の膜厚に換算することを特徴とする。

【0013】請求項7に記載の膜厚測定方法は、基板に形成された薄膜上で電子ビームを走査し、該電子ビームの複数の走査位置における前記薄膜を貫通して基板に達した貫通電流をそれぞれ検出し、それぞれの貫通電流を、前記薄膜と同一材料の標準試料についての貫通電流と膜厚との相関データから膜厚に換算して、前記薄膜の膜厚分布を求めることを特徴とする。

【0014】請求項8に記載の膜厚測定方法は、請求項5または請求項6に記載の膜厚測定方法において、前記電子ビームを前記薄膜面に対して垂直に入射させることを特徴とする。

【0015】本発明の膜厚測定装置および膜厚測定方法は、基板表面から飛び出した二次電子を測定するのではなく、従来とは全く逆に被測定薄膜を貫通し基板に到達

する電子ビーム量を測定することに特徴がある。薄膜を貫通して基板に達する電子量は、試料に当たった電子ビーム量と基板表面から飛び出した二次電子の関数であるが、基板表面から四方に発散する二次電子を全て捕集することが困難であるのに比較して、貫通電流は測定対象物の形状に関わらず被測定対象部を通過したすべての電子の集合体からなるので、薄膜部の情報を定量的に捕らえる事が出来る。

【0016】第17図に、本発明の測定原理を示す。本原理図では、シリコン基板171の上にナノメートルオーダーのシリコン酸化膜172が形成されている場合を用いて説明する。まず、電子銃から一定の電子量となるように制御された電子ビームを被測定対象である薄膜試料に照射する。試料から放出される二次電子の量は照射される電子ビームの軸の傾斜の影響を受けるので、電子ビームの軸は試料表面に対して一定傾斜を持つように調節する。広い範囲の測定を行う場合もその範囲で電子ビームが一定の傾斜角度を持つように調節する。一般に、電子銃から真空中に放出される電子ビーム173はインピーダンスが非常に高いので、電子ビーム量は電子銃のフィラメント電圧および加速電圧等の制御条件を一旦定めると、測定対象物の電気インピーダンスに無関係にほぼ一定となる。電子銃から放出された電子ビームの量は既知である必要があるが、それは予めファラデーカップ等を用いて測定する方法、あるいはビーム近傍に発生する電磁場の強さから測定する方法、電子銃に流れ込む電流を直接測定するなどの方法、あるいは貫通電流と二次電子を同時に測定してその両者の差から演算によって求める方法などがある。それぞれの値は加速電圧に依存するので、電子銃の制御パラメータを変更するたびに測定する。一定の電子ビーム注入電流 $I_{in}$ に対する二次電子放出量 $I_s$ は、二次電子の脱出深さ以内に存在するシリコン膜から放出される2次電子 $I_s(Si)$ とシリコン酸化膜から放出される2次電子 $I_s(O)$ との合計で与えられる。支持基板上に設けられたシリコン酸化膜の膜厚を $d$ として貫通電流 $I_p$ は、式(1)で与えられる。ここでは、シリコンおよびシリコン酸化膜の2次電子放出比をそれぞれ $SEC(Si)$ と $SEC(O)$ 、2次電子の脱出深さを $L$ とする。

【数1】

$$\begin{aligned} I_p &= I_{in} - I_s \\ &= I_{in} - (I_s(Si) + I_s(O)) \\ &= I_{in} [1 - (1/L) \{ (L-d) \cdot SEC(Si) + d \cdot SEC(O) \}] \end{aligned}$$

【0017】第18図に示したように、シリコン酸化膜172は二次電子放出比が大きいので、電子を照射すると注入した以上の電子が二次電子としてシリコン酸化膜表面から飛び出すため、試料に電子ビームを注入しているのも関わらず、貫通電流174は電子が電流アンプ(電流増幅器)175からシリコン基板171に吸い込まれるような実験結果を与える。第18図では、電子が

シリコン基板裏面から電流アンプに向かって出て行く場合を正として表示している。酸化膜の膜厚が0の時は、シリコン基板に電子が実質的に注入される正の貫通電流が観測される。酸化膜の膜厚が0から増加すると、二次電子放出量が増加するので貫通電流は膜厚dに比例して負の方に増加する。一方、dが脱出深さよりも厚い場合は、試料貫通電流は、脱出深さ以内にあるシリコン酸化膜172の二次電子放出比のみで決定されるため、ほぼ一定の値に観測される電流値が飽和する。また、酸化膜が非常に厚いときは、電流が0となり、酸化膜が非常に薄く残っている場所および抜けている場所とは異なる電流値を示すのでそれぞれ区別される。電子ビーム加速電圧が一定のとき、シリコン酸化膜の膜厚に対する貫通電流の比率は一定であるので、検量線を予め作成しておいてそのデータを記憶装置11(図1参照)に記憶しておき、未知の測定対象を同様の方法で測定した後に、両者を比較換算する事により試料を貫通した電流から試料表面にある薄膜の膜厚を定量的に求める事ができる。また、一般に、二次電子放出比は元素に固有の値であり、特定の加速電圧に対する二次電子放出比は元素ごとに異なった値をとる。従って、加速電圧を色々変えて同一の薄膜試料の貫通電流を測定することによって元素の種類を推定出来る。

【0018】

【発明の実施の形態】次に、本発明の実施形態について図面を参照して詳細に説明する。尚、図において、同等の要素に対しては同符号を付してその説明を省略する。第1図に、本発明の膜厚測定装置の第一の実施形態を示す。第一の実施形態では、薄膜試料1に加速電圧と電流量が既知の電子ビーム2を注入するための電子銃(電子ビーム照射手段)3、薄膜試料が固定された基板4の下部に接触配置された電極5、その電極5に集められた微小な電流を増幅するための電流増幅器(電流検出手段)6、および測定装置のオフセットを取り除き測定系を安定させるための差動増幅器(電流検出手段)7、また、その結果を途中でモニターするためのデジタルマルチメータ8、差動増幅器の出力をコンピュータで扱えるようにするためのA/D変換器(電流検出手段)9、およびその変換されたデジタルデータを記憶するための記憶装置(電流検出手段)10、既存の標準試料を用いて測定した検量線データを記憶している記憶装置(膜厚換算手段)11およびそのデータと測定データを比較するための比較装置(膜厚換算手段)12、これらの作業を自動的に行うためのCPU13、および計算結果を表示するためのディスプレイ14からなる。薄膜試料1は、 $10^{-4}$ mb以下の真空中に置かれている。

【0019】本装置は、次のように動作する。電子銃3から数ピコアンペアから数マイクロアンペアの電子ビームが試料に向かって放出される。放出された電子ビーム2は、薄膜試料1を貫通して基板4に達する。基板表面

にある薄膜に当たると薄膜材料特有の二次電子放出比で決まる割合の二次電子を放出する。照射電子ビームの内、その残りが薄膜を貫通して基板へ到達して貫通電流となり最終的に電極5に集められる。照射する電子ビーム電流が例えば100pAのとき、貫通電流はそれと同じあるいは1桁程度大きいものが得られる。集められた電流はおよそ10の7乗倍、電流増幅器6にて増幅される。測定される電流は極めて小さいので、測定対象薄膜を貫通した電流以外の配線間漏れ電流も存在する。そのため、オフセット調節機能のある差動増幅器7に入力され漏れ電流からなるオフセット電圧を取り除くとともに約10倍の増幅を行う。オフセット電圧の補正は電子ビームを照射していないときの電流と電子ビームを照射しているときの差を利用して行う。一般に、電流増幅器は速度が遅く発振を起こしやすいので、高い倍率の増幅を行う場合には、電流増幅器とその出力電圧をさらに増幅する高速の電圧増幅器の2段で増幅すると測定系が安定となる。増幅結果は、A/D変換器9によってデジタル信号に変換され記憶装置10に記憶される。一方、被測定対象薄膜と同じ構成材料からなる既知膜厚の薄膜部を持つ標準試料を用いて、薄膜の膜厚と貫通電流の関係を予め実験して求めておき、その対応関係を表す検量線データが記憶装置11に貯えられている。先ほど記憶装置10に貯えられたデータと比較装置12を用いて両者の比較を行う。この比較により電流データは薄膜の膜厚へと換算される。これら一連の動作は、CPU13およびそれを動かすための一般に知られたC等の高級言語あるいは機械語等による直接制御を指示する制御プログラム15によって行われ、換算結果がディスプレイ14に示される。

【0020】第2図は、実際にp型シリコン基板上に0.9nmから12nmの膜厚を持つシリコン酸化膜を設けて電子ビームを当て、その時に生じた貫通電流を測定したものである。シリコン酸化膜の膜厚は、予めエリブソメトリを用いて測定してある。シリコン酸化膜の膜厚が0から増加していくに連れて、貫通電流は負側に増加する。おおよそシリコン酸化膜の脱出深さといわれる10nm当たりで飽和が見られる。加速電圧を変えると、シリコン酸化膜厚みと貫通電流の比率が変化する。脱出深さは、二次電子のエネルギーで決まるため加速電圧の影響は余りうけない。実験結果では、加速電圧が0.5kVの加速電圧よりも1.2kVの場合に、より大きな傾斜が得られ、膜厚変化に対する電流の変化量が大きく検出感度が高くなる。これらの測定データより、例えば、膜厚を電流量×係数+定数のような近似式等を用いて直線部分を解析的に扱えるようにして検量線データとする。この検量線データより、例えば未知の試料に1kVの電子ビームを当てた際に観測された貫通電流が-3500pAである場合、その試料の酸化膜厚みは6nmであるとわかる。

【0021】第3図から第15図は、測定試料例を示す。第3図は、平坦なシリコン基板31の上に、厚みが

1nm以下のシリコン酸化膜32が形成された試料を示している。この構造は、トランジスタ上のゲート酸化膜形成後によく見られる構造である。シリコン酸化膜32側から当てられた加速電圧が1kV程度の電子ビーム33は、シリコン酸化膜32を貫通しシリコン基板31に達する。前述したように、基板表面から放出される二次電子量は、シリコン酸化膜32由来のものとシリコン基板31由来のものの両者からなるが、シリコン基板よりもシリコン酸化膜の方が二次電子放出比が大きいので、シリコン酸化膜の膜厚に比例してシリコン酸化膜表面から放出される二次電子量が増加し、その結果として、シリコン基板を貫通して電極で集められる電流量が減少する。この関係は、常に一定であるので、貫通電流量を測定することにより、シリコン基板21上に設けられたシリコン酸化膜22の膜厚を知る事が出来る。電子ビームを小さな径に絞れば、100nm以下の小さな領域のシリコン酸化膜厚みの測定に向く。電界放出型の電子銃を用いれば、1kV程度の加速電圧でも数nm程度まで絞る事が出来るので、その領域の厚みを知る事が出来る。逆にビームを広げれば、広い範囲の平均的な膜厚を知る事が出来る。ビームを広げた場合にも、ビームを構成するそれぞれの部分の電子ビームが試料面に対して為す傾斜は同一となるようにする。

【0022】第4図は、シリコン基板41上に設けられたシリコン酸化膜42に穴43が設けられており、その穴の底にあるシリコン酸化膜44の膜厚を測定する場合を示している。この構造はDRAM等でシリコン基板上に設けられたトランジスタからコンタクトを取るコンタクトホール構造と良く似ている。コンタクトホールは、シリコン酸化膜を表面からRIE等でエッチングして作製するが、エッチングが何らかの原因で不足すると、コンタクトホール底にシリコン酸化膜が残ったままとなることがある。本実施例は、そのような残りシリコン酸化膜44を検出する場合に相当する。SEMなど基板表面から放出される二次電子量の変化を定性的に用いて画像を形成する装置では、コントラストさえ得られれば良いので、電子ビームの照射時の電子ビーム軸の傾斜角度は特に一定となっておらず、試料の場所によって大きく異なっている。そのため、試料中央部では電子ビームは垂直に入射するが、試料周辺部ではかなり傾いた電子ビームが試料に加えられている。本発明は、従来と異なり、試料のどの部分にも垂直に電子ビームが照射されることに特徴がある。従来のようにビームが傾斜を持つと、入射電子ビームはコンタクトホールの側面に衝突して二次電子を発生しながら減速し、コンタクトホールの底には直接当たらない。特定加速電圧電子ビームに対する検量線と良い一致がえられる貫通電流を得るには、照射電子が直接コンタクトホール底のシリコン酸化膜に当る必要がある。そこで、本実施例では電子ビーム45はシリコン酸化膜42に設けられた穴43の中にほぼ垂直入

射される。垂直入射した電子ビームは側面にある酸化膜には当らずに、穴の底にあるシリコン酸化膜44に直接当たる。コンタクトホール底のシリコン酸化膜44に当たった電子ビームは酸化膜厚みに比例した二次電子を放出する。放出された電子は穴から外に出る場合もあれば、穴を形成している酸化膜42に吸収される場合もある。しかし、いずれにしても穴の底にあるシリコン酸化膜44を通過した電子ビームは底にある酸化膜の膜厚に逆比例した量になるため、その値を測定することによって穴の底にある酸化膜の膜厚を知る事が出来る。

【0023】第5図は、金属配線51の上に設けられたシリコン酸化膜52の厚みを測定する例を示している。シリコン酸化膜52を貫通した電子ビーム53は、金属配線51に達する。一般に、シリコン酸化膜は、1kV程度の加速電圧の電子ビームを照射した場合に、2から3の二次電子放出比を有するのに対して、アルミニウム等の金属膜は1近傍の二次電子放出比を持つ。従って、電子ビームをシリコン酸化膜の無い試料表面に当てると、ほとんど貫通電流量がゼロとなり、最表面にあるシリコン酸化膜厚みを増加するに連れて、厚みに比例した貫通電流が得られる。この電流を検量線を用いてシリコン酸化膜厚みに換算すれば、金属配線上にある酸化膜の膜厚を知る事が出来る。一般に、下地となる材料から放出される二次電子は、最表面の薄膜が全く無いときのオフセット電流として検出され、その値を貫通電流から引けば、殆どの場合、下地材料に依存しない最表面層を構成する材料の検量線が得られる。

【0024】第6図は、アルミニウム等の金属薄膜61上にシリコン酸化膜62が設けられ、その一部に穴63が開けられており、その穴の底のシリコン酸化膜65の厚みを測定する場合を示している。穴63に垂直入射した電子ビーム64は、穴の底にあるシリコン酸化膜65に当たる。シリコン酸化膜に当たった電子ビームは、シリコン酸化膜の膜厚に比例した二次電子を放出する。放出された電子は、穴から外に出る場合もあれば、穴を形成しているシリコン酸化膜62に吸収される場合もある。しかし、いずれにしても穴の底にあるシリコン酸化膜65を通過した電子ビームは、底にあるシリコン酸化膜の膜厚に比例した量になるため、その値を測定することによって穴の底にあるシリコン酸化膜の膜厚を知る事が出来る。

【0025】第7図は、先ほどの実施例とは逆に、SOI基板の上のように絶縁膜であるシリコン酸化膜73の上にナノメートルオーダーの厚みを持つ金属薄膜72が設けられた場合の測定を示している。金属薄膜72を貫通した電子ビームは、シリコン酸化膜73に達する。シリコン酸化膜は2から3の二次電子放出比を有し、アルミニウム膜等の金属薄膜72は1近傍の二次電子放出比を持つため、両者の二次電子放出比は大きく異なる。従って、金属膜の膜厚に比例した貫通電流が得られる。こ

の電流を金属膜の膜厚に換算する検量線を用いて換算すれば、シリコン酸化膜の上にある極薄の金属薄膜の膜厚を知る事が出来る。一般に、シリコン酸化膜に比べて金属の二次電子放出比は小さいので、この検量線は、金属薄膜の膜厚が増加するに連れて貫通電流量が正側に増える右肩上がりの検量線となる。

【0026】第8図は、シリコン酸化膜83上に金属（例えば、アルミニウム）薄膜82が設けられ、その一部に穴85が開けられており、その穴の底の金属（例えば、アルミニウム）薄膜84の膜厚を測定する場合を示している。垂直入射した電子ビーム81は、穴の底にある金属薄膜84に当たる。金属薄膜に当たった電子ビームは、金属膜の膜厚に比例した二次電子を放出する。放出された電子は、穴から外に出る場合もあれば、穴を形成している金属膜に吸収される場合もある。しかし、いずれにしろ穴の底にある金属膜を通過した電子ビームは、底にある金属膜の膜厚に比例した量になるため、その値を測定することによって穴の底にある金属膜の膜厚を知る事が出来る。

【0027】第9図は、シリコン基板91上に設けられたシリコン酸化膜92からなるパターンの膜厚分布を測定する膜厚測定装置および膜厚測定方法の第二の実施形態を示している。電子ビーム93自身を走査あるいは基板を可動ステージ（電子ビーム走査手段）等で移動して、電子ビームが照射されている測定部94の位置を変える。測定部の位置情報（X、Y）と貫通電流95を対応させて記憶装置（位置電流記憶手段）10に記憶する。貫通電流量は、検量線データ11と比較器12によって比較され、貫通電流からシリコン酸化膜の膜厚に変換される。特に、検量線データは直線性が良いので、1次式あるいは2次式程度で表して、その係数を記憶するようにして、必要とされる換算値を近似式より計算で求める。本装置からは、シリコン酸化膜の膜厚分布が分かると同時に、シリコン酸化膜パターン幅96も測定する事が出来る。構成元素が一定でない薄膜や二次電子放出比が異なる材料が、被測定対象の薄膜中に含まれているとそれらは異なった膜厚領域として検出できる。

【0028】第10図は、シリコン基板101上に設けられたシリコン酸化膜102に穴103が設けてあり、その穴の中にあるシリコン酸化膜104の厚みプロファイルを測定する場合を示している。穴を通過する程度に垂直にビーム軸を立てられた電子ビーム105を利用し、穴の中に電子ビームを注入する。穴の底にあるシリコン酸化膜104に当たった電子ビームは、シリコン酸化膜厚みに比例した二次電子を放出する。放出された電子は、穴103から外に出る場合もあれば、穴を形成しているシリコン酸化膜102に吸収される場合もある。しかし、いずれにしろ穴の底にあるシリコン酸化膜104を通過した電子ビームは、底にあるシリコン酸化膜の膜厚に比例した量になるため、その値を測定することによ

って穴の底にあるシリコン酸化膜の膜厚を知る事が出来る。貫通電流量は、検量線データと比較装置によって比較され、貫通電流からシリコン酸化膜の膜厚に変換される。特に、検量線データは直線性が良いので、1次式あるいは2次式程度で表しておき、近似式を用いて中間の値を計算する。本測定方法で穴や溝の中にあるシリコン酸化膜の厚みが分かると同時にシリコン酸化膜パターンの幅も測定する事が出来る。この場合、電子ビーム全体が穴の中に入ってしまうほど絞られている必要は必ずしも無く、ビームの形状が平坦であれば、ビームエッジの移動によって生じる電流量の変化を用いて穴底の形状を求める事が出来る。図では、酸化膜が残っている場合を示しており、電流がマイナス側に観察されているが、シリコン膜が露出している領域ではプラス側に電流が観察され、両者は分離される。具体的な応用例としては、エッチング終了後のコンタクトホール底形状の測定がある。アスペクト比率の高いコンタクトホールでは、開口部の大きさと底の大きさが一般的に異なっており、特にシリコン基板が露出しているコンタクトホール底の大きさを知る事が重要である。本手法をコンタクトホールに適用すれば、コンタクトホール底の形状を測定したり、底に出ているシリコン領域の幅や面積および形状を知る事が出来る。

【0029】第11図は、本発明の第11の実施例を示している。本実施例では、電子銃あるいは被測定対象を2次元に移動させて、2次元の膜厚分布測定を行う方法を示している。電子銃は、試料が平坦である場合には、被測定面に対して必ずしも垂直である必要はないが、測定範囲において、どの部分にも同じ角度で電子ビームが照射されるようにする。穴や溝の底にある薄膜の膜厚を測定する場合には、穴の底に電子ビームが十分に直接届くように電子ビームを垂直に保つ。電子ビームの走査は、電子ビーム自身に偏向電圧をかけて左右に曲げる事は行わず、電子ビーム照射は、軸が垂直になるように2次元に電子ビームを走査するあるいは電子ビーム軸を垂直に保ったまま電子銃を移動させて行う。電子銃の電子ビーム放出軸を固定して、試料を2次元に移動させてもよい。以上の状態で、電子ビーム照射場所の二次元座標112と貫通電流113の関係を記憶しながら、順次測定位置を移動して、試料全体の測定を行い、貫通電流からシリコン酸化膜の膜厚へ変換を行い、二次元座標112に垂直に取った軸にシリコン酸化膜の膜厚をプロットすれば、薄膜の二次元膜厚分布が得られる。

【0030】第12図は、最表面にシリコン酸化膜121、2層目にアルミニウム122等の金属薄膜、そしてその下にシリコン基板123等の支持基板からなる多層膜の測定を示している。電子ビーム124を試料表面から1kV程度の加速電圧で加速された電子ビームを照射すると、表面から50nm程度までの深さに電子ビームが到達する。しかし、前述したように、貫通電流に影響を及ぼ



すのは表面から10nm以内にある物質の二次電子放出比である。表面から1層および2層を構成するシリコン酸化膜121とアルミ122は二次電子放出比が異なるため、第1層の膜厚に比例した二次電子が放出され、貫通電流もそれにしたがって変化する。しかし、表面から第3層までの距離が10nm以上であれば、観測される貫通電流の大きさは、第3層からの影響を受けないため、第1層と第2層を構成するシリコン酸化膜とアルミの二次電子放出効果を反映した検量線データを用いる事で、最表面のシリコン酸化膜の膜厚を知る事が出来る。

【0031】第13図は、シリコン基板131上に設けられたアルミ配線132上に、更にシリコン酸化膜133が形成され、その一部分に穴134が設けられており、その底にあるシリコン酸化膜135の膜厚を測定する場合を示している。穴134に電子ビーム136を垂直入射する。電子ビームは穴の底のシリコン酸化膜に当り、シリコン酸化膜の膜厚に比例した二次電子を放出する。その放出した電子は穴から外に出る場合もあれば、穴を形成しているシリコン酸化膜133に吸収される場合もある。しかし、いずれにしろ、穴の底にあるシリコン酸化膜を通過した電流は、金属配線132の膜厚が10nmよりも厚い場合は、穴の底にあるシリコン酸化膜135の膜厚に比例した量になるため、その値を測定することによって、穴の底にあるシリコン酸化膜の膜厚を知る事が出来る。金属配線の膜厚が10nmよりも薄い場合には、配線の下にあるシリコン基板131からの二次電子放出も貫通電流に影響を与えるため、その場合には、シリコン基板131を含めた検量線を予め作る事によって、穴の底のシリコン酸化膜の膜厚を精密に測定できる。

【0032】第14図は、最表面にシリコン酸化膜141、2層目に窒化膜142そしてその下にシリコン基板143等の支持基板からなる多層膜の測定を示している。電子ビーム144を試料表面から1kV程度の加速電圧で加速された電子ビームを照射すると、表面から50nm程度までの深さに電子ビームが到達する。しかし、前述したように、貫通電流に影響を及ぼすのは、表面から10nm以内にある物質の二次電子放出比である。表面から1層および2層を構成するシリコン酸化膜141と窒化膜142は二次電子放出比が異なるため、第1層の膜厚に比例した二次電子が放出され、貫通電流もそれにしたがって変化する。しかし、表面から第3層までの距離が10nm以上であれば、観測される貫通電流の大きさは第3層からの影響を受けないため、第1層と第2層を構成するシリコン酸化膜と窒化膜の二次電子放出効果を反映した検量線データを用いる事で、最表面のシリコン酸化膜の膜厚を知る事が出来る。

【0033】第15図は、シリコン基板151上に設けられた窒化膜152上に更にシリコン酸化膜153が形成され、その一部分に穴154が設けられており、その

底にあるシリコン酸化膜155の厚みを測定する場合を示している。穴154に電子ビーム156を垂直入射する。電子ビームは穴の底のシリコン酸化膜に当りシリコン酸化膜の膜厚に比例した二次電子を放出する。その放出した電子は穴から外に出る場合もあれば、穴を形成しているシリコン酸化膜153に吸収される場合もある。しかし、いずれにしろ穴の底にあるシリコン酸化膜を通過した電流は、窒化膜152の膜厚が10nmよりも厚い場合は、穴の底にあるシリコン酸化膜155の膜厚に比例した量になるため、その値を測定することによって穴の底にあるシリコン酸化膜の膜厚を知る事が出来る。窒化膜152の膜厚が10nmよりも薄い場合には、配線の下にあるシリコン基板151からの二次電子放出も貫通電流に影響を与えるため、その場合には、シリコン基板151を含めた検量線を予め作る事によって、穴の底のシリコン酸化膜の膜厚を精密に測定できる。

【0034】第16図は、本発明の第三の実施形態を示している。本実施形態では、貫通電流測定と二次電子測定を組み合わせることに特徴がある。第1図で示した構成に、二次電子検出器（二次電子検出手段）162およびその信号を増幅する増幅器161がさらに加えられた構成となっている。前述したように、特定の物質に一定量の電子ビームを照射した場合、照射電子は、二次電子と貫通電流の2つに分離し、その関係は式(1)で与えられる。その分離の程度は、測定対象の二次電子放出比および膜厚に固有である。従って、その両者を同時に測定した検量線を用いれば、入射電子ビーム量、二次電子放出量および貫通電流量からなる測定パラメータが一義的に定まり、貫通電流のみを利用するより、正確に膜厚を測定出来る。この場合は、二次電子放出比が正確に求まるため、材料の二次電子放出比が正確に予め分かっている場合には材料分析を行う事も出来る。一方、二次電子を用いて膜厚を測定する装置では、基板表面付近の電位の影響を大きく受けるため、同じシリコン酸化膜の膜厚の試料でも、周りにある物質による電位の状況によって、回収される二次電子の量が変化するあるいは全ての二次電子が二次電子検出器に回収されないため、他のデータと比較したり出来るような真の意味での定量的測定は出来ない。しかし、貫通電流をある少数サンプルに対して予め測定を行ったのちに、その値を用いて二次電子の捕集効率を求めて真の二次電子放出量に換算する事により、定量的な測定が可能となる。

【0035】

【発明の効果】以上詳細に説明したように、本発明に係る膜厚測定装置または膜厚測定方法によれば、以下のような効果を奏する。従来では不可能であったナノメートルオーダーの極薄膜の膜厚を定量的に再現性良く測定できる。平坦な面に存在する薄膜の膜厚を定量的に知る事が出来るばかりでなく、アスペクトレシオが5を超えるような非常に高アスペクトレシオを有するコンタクトホ

ール底のような場所に存在する極薄膜の膜厚も測定することができる。複数の膜からなる多層膜でも、最表面の膜厚のみが測定可能である。また、膜の形成前の貫通電流を測定して、膜形成後の貫通電流と比較する事により、何層の膜を形成してもそれぞれの膜厚を知る事が出来る。測定試料例では、材料としてシリコン、シリコン酸化膜、アルミのみを用いて説明したが、本発明はそれに留まることなくW、Mo、Pt、Au、Cu、Ti、シリサイド、窒化膜、強誘電体、ポリイミド、レジスト、フルオロカーボン、炭素、蛋白質、DNA等あらゆる材料の厚み測定に応用する事が出来る。穴の形状も二次電子放出に十分な加速電圧を有した電子ビームが被測定箇所当たりさすればどのような開口形状を有していても構わない。照射する電子ビームの加速電圧は、測定試料の最表面である第1層と第2層の二次電子放出比が最も大きく取れる電圧を選ぶ事が望ましい。測定箇所下部に絶縁領域が存在する場合には、より高い加速電圧を用いてその領域を貫通しても良い。また、加速電圧を変えて測定しても良い。微小箇所の汚染材料の同定やその膜厚などを知る事にも利用できるため、洗浄が終了したか否かの判定に利用できる。適当な敷居値を用いて自動判定すれば、エッチングが良好に行われたか否かを検査する検査装置として利用できる。薄膜の貫通電流は、基板の裏面から取り出した例を本実施例では示しているが、基板表面に裏面に貫通した電流を取り出すための電極を設けても構わない。また、基板の裏面に絶縁膜があっても、本発明の測定方法は利用できる。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明に係る膜厚測定装置の第一の実施形態を示す概略図である。

【図2】 シリコン酸化膜の膜厚と貫通電流の関係を示す図である。

【図3】 本発明の膜厚測定装置で測定可能な試料の例である。

【図4】 本発明の膜厚測定装置で測定可能な試料の例である。

【図5】 本発明の膜厚測定装置で測定可能な試料の例である。

【図6】 本発明の膜厚測定装置で測定可能な試料の例である。

【図7】 本発明の膜厚測定装置で測定可能な試料の例である。

【図8】 本発明の膜厚測定装置で測定可能な試料の例である。

【図9】 本発明に係る膜厚測定装置の第二の実施形態を説明するための概略図と、それにより測定可能な試料の例である。

【図10】 本発明に係る膜厚測定装置の第二の実施形態を説明するための概略図と、それにより測定可能な試料の例である。

【図11】 本発明に係る膜厚測定装置の第二の実施形態を説明するための概略図と、それにより測定可能な試料の例である。

【図12】 本発明の膜厚測定装置で測定する試料の例である。

【図13】 本発明の膜厚測定装置で測定する試料の例である。

【図14】 本発明の膜厚測定装置で測定する試料の例である。

【図15】 本発明の膜厚測定装置で測定する試料の例である。

【図16】 本発明に係る膜厚測定装置の第三の実施形態を示す概略図である。

【図17】 本発明の原理を説明するための図である。

【図18】 シリコン酸化膜の膜厚と貫通電流の関係を示す図である。

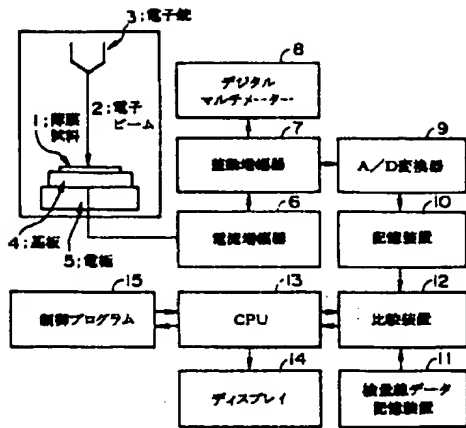
【図19】 従来の膜厚測定装置を示す図である。

#### 【符号の説明】

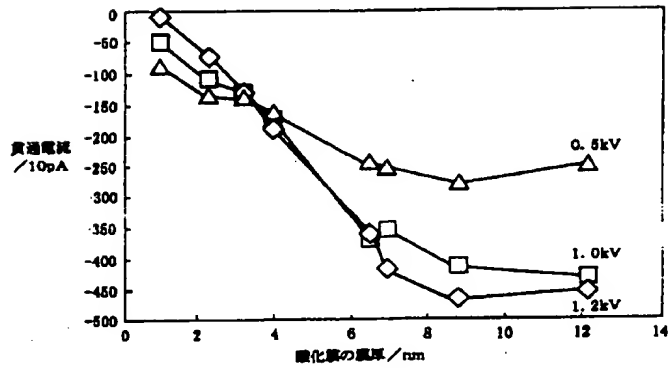
- 1 薄膜試料（薄膜）
- 2 電子ビーム
- 3 電子銃（電子ビーム照射手段）
- 4 基板
- 5 電極
- 6 電流増幅器（電流検出手段）
- 7 差動増幅器（電流検出手段）
- 9 A/D変換器（電流検出手段）
- 10 記憶装置（電流検出手段）
- 11 検量線データ記憶装置（膜厚換算手段）
- 12 比較装置（膜厚換算手段）
- 95 貫通電流
- 162 二次電子検出器（二次電子検出手段）
- 195 二次電子
- 196 二次電子検出器（二次電子検出手段）



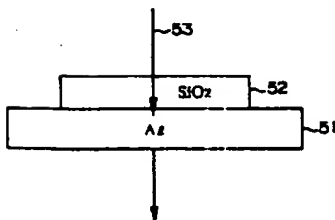
【図1】



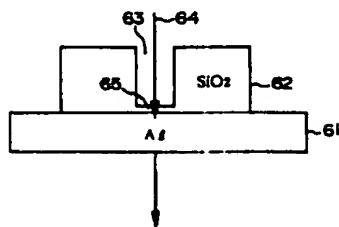
【図2】



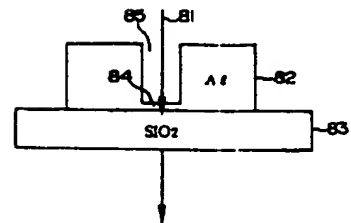
【図5】



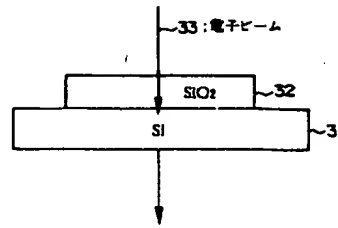
【図6】



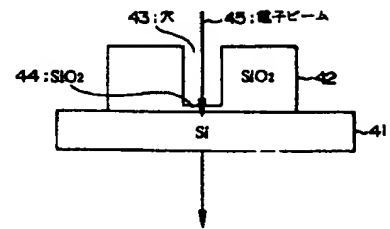
【図8】



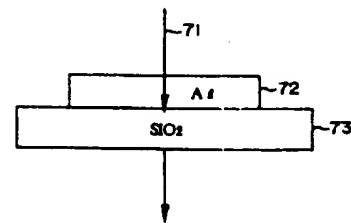
【図3】



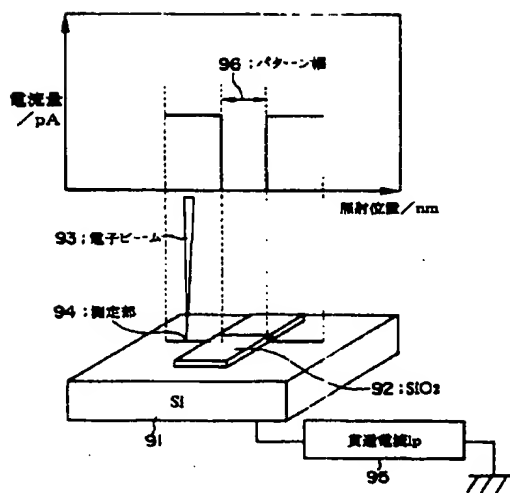
【図4】



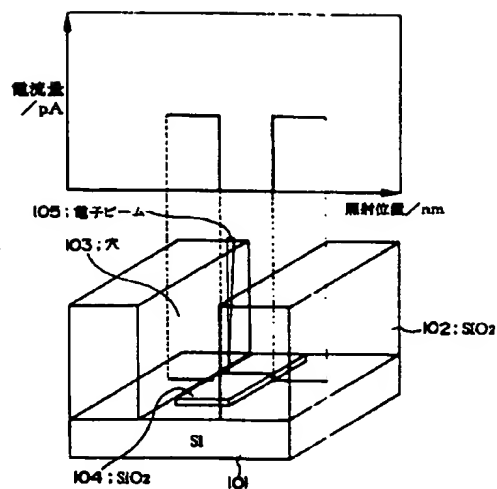
【図7】



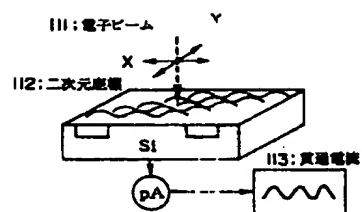
【図9】



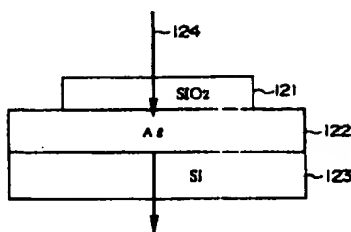
【図10】



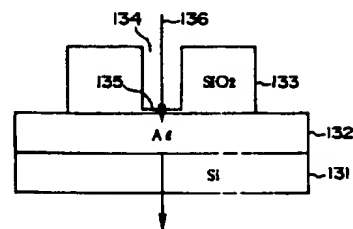
【図11】



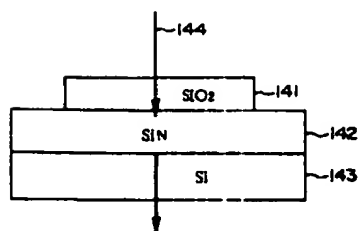
【図12】



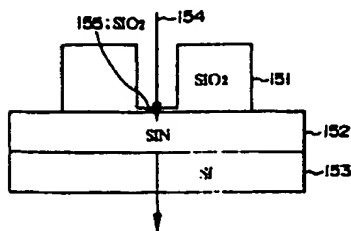
【図13】



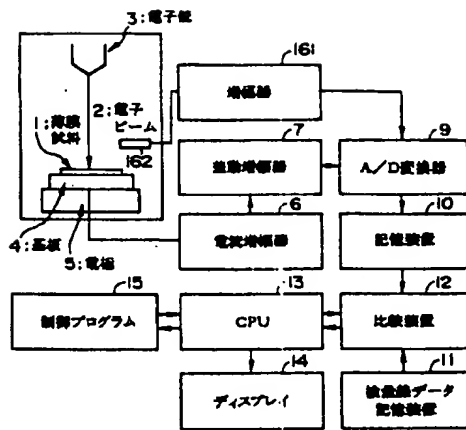
【図14】



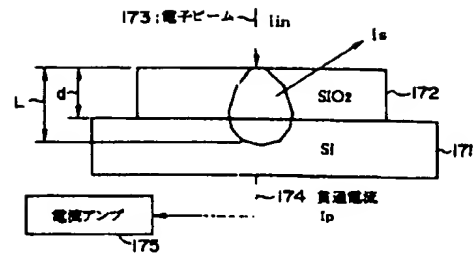
【図15】



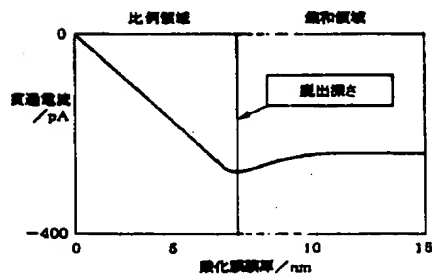
【図16】



【図17】



【図18】



【図19】

